HỌC VIỆN
CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC
KINH TẾ - KỸ THUẬT CÔNG NGHIỆP

TRƯỜNG ĐẠI HỌC
SƯ PHẠM KỸ THUẬT HƯNG YÊN

HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA

KHOA HỌC TỰ NHIÊN VÀ ỨNG DỤNG TRONG THỜI ĐẠI SỐ

NATURAL SCIENCES AND APPLICATIONS IN THE DIGITAL AGE



NSA
2026

NHÀ XUẤT BẢN TRI THỨC

HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA
KHOA HỌC TỰ NHIÊN VÀ ỨNG DỤNG TRONG THỜI ĐẠI SỐ
NATURAL SCIENCES AND APPLICATIONS IN THE DIGITAL AGE

HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA
KHOA HỌC TỰ NHIÊN VÀ ỨNG DỤNG TRONG THỜI ĐẠI SỐ
NATURAL SCIENCES AND APPLICATIONS IN THE DIGITAL AGE

NSA
2026

NHÀ XUẤT BẢN TRI THỨC

Lô D20, Ngõ 19 Duy Tân, Phường Cầu Giấy, TP. Hà Nội
Điện thoại: (024) 6687 8415
E-mail: lienhe@nxbtrithuc.com.vn
Website: https://nxbtrithuc.com.vn

ISBN: 978-632-636-012-7
SÁCH KHÔNG BÁN



TRƯỜNG ĐẠI HỌC
KINH TẾ-KỸ THUẬT CÔNG NGHIỆP



HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ
BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



TRƯỜNG ĐẠI HỌC
SƯ PHẠM KỸ THUẬT HƯNG YÊN

HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA

KHOA HỌC TỰ NHIÊN VÀ ỨNG DỤNG TRONG THỜI ĐẠI SỐ (LẦN THỨ 3)

THE 3rd NATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL SCIENCES AND APPLICATIONS IN THE DIGITAL AGE

NSA2026

NHÀ XUẤT BẢN TRI THỨC

CÁC BAN CỦA HỘI THẢO NSA2026

1. BAN CHỈ ĐẠO

Trưởng ban

TS. Trần Hoàng **Long** (UNETI)

Đồng trưởng ban

PGS. TS. Bùi Trung **Thành** (UTEHY)

TS. Nguyễn Trung **Kiên** (PTIT)

Thành viên

PGS. TS. Phạm Thị Thu **Hoài** (UNETI)

GS. TS. Nguyễn Quang **Liêm** (VPS)

GS. TSKH. Vũ Hoàng **Linh** (VMS)

PGS. TS. Lê Minh **Hà** (VIASM)

TS. Trần Nam **Tú** (KHCN&MT – Bộ GD&ĐT)

2. BAN TỔ CHỨC

Trưởng ban

PGS. TS. Nguyễn Hữu **Quang** (UNETI)

Đồng trưởng ban

PGS. TS. Bùi Trung **Thành** (UTEHY)

TS. Nguyễn Trung **Kiên** (PTIT)

Thành viên

GS. TS. Phạm Ngọc **Anh** (PTIT)

TS. Vũ Hồng **Sơn** (UTEHY)

TS. Ngô Đức **Thiện** (PTIT)

TS. Nguyễn Anh **Tuấn** (UNETI)

TS. Nguyễn Thị **Thúy** (UTEHY)

TS. Trần Thị Hoàng **Yến** (UNETI)

3. BAN CHƯƠNG TRÌNH

Trưởng ban

GS. TS. Đặng Văn **Soa** (UNETI)

Đồng trưởng ban

GS. TS. Phạm Ngọc **Anh** (PTIT)

GS. TSKH. Phạm Kỳ **Anh** (VNU - HUS)

Thành viên

GS. TS. Đặng Quang **Á** (VAST)

GS. TS. Nguyễn Đức **Chiến** (HUST)

GS. TSKH. Đinh Nho **Hào** (VAST)

GS. TSKH. Phạm Thế **Long** (MTA)

GS. TSKH. Lê Dũng **Mưu** (VAST)

GS. TSKH. Nguyễn Khoa **Sơn** (VAST)

PGS. TS. Nguyễn Xuân Ca (TNUS)

PGS. TS. Đỗ Xuân **Chợ** (PTIT)

PGS. TS. Nguyễn Văn **Hậu** (UTEHY)

PGS. TS. Nguyễn Long **Giang** (VAST)

PGS. TS. Trần Hải **Đức** (VNU - HUS)

PGS. TS. Bùi Văn **Định** (MTA)

PGS. TS. Hà Tiến **Ngoạn** (UNETI)

PGS. TS. Nguyễn Thị Kim **Sơn** (HAUI)

PGS. TS. Chu Cẩm **Thơ** (Phenikaa-Uni)

TS. Nguyễn Thị **Thúy** (UTEHY)

TS. Trần Thị Hoàng **Yến** (UNETI)

4. BAN BIÊN TẬP

Trưởng ban

TS. Trần Thị Hoàng **Yến** (UNETI)

Đồng trưởng ban

TS. Nguyễn Thị **Thuý** (UTEHY)

TS. Lê Văn **Ngọc** (PTIT)

Thành viên

TS. Đàm Nhân **Bá** (UTEHY)

TS. Nguyễn Quang **Chung** (UTEHY)

TS. Hoàng Phi **Dũng** (PTIT)

TS. Trịnh Thị Thúy **Hồng** (UTEHY)

TS. Chu Bình **Minh** (UNETI)

TS. Lê Xuân **Huy** (UNETI)

TS. Lê Thị Minh **Thanh** (PTIT)

5. BAN THƯ KÍ

Trưởng ban

Nguyễn Anh **Tuấn** (UNETI)

Đồng trưởng ban

TS. Vũ Hồng **Sơn** (UTEHY)

TS. Giáp Văn **Cường** (UTEHY)

Thành viên

TS. Lê Văn **Ngọc** (PTIT)

TS. Trần Hồng **Thái** (UTEHY)

ThS. Trương Thị **Thủy** (UNETI)

ThS. Đoàn Thị Diệp **Uyển** (UNETI)

ThS. Nguyễn Hải **Yến** (PTIT)

6. BAN CHUYÊN MÔN

a. Tiểu ban 1: Mô hình, Thuật toán và Ứng dụng

Trưởng tiểu ban

GS.TS. Phạm Ngọc **Anh** (PTIT)

Đồng trưởng tiểu ban

PGS.TS. Hà Tiến **Ngoạn** (UNETI)

Thư ký

TS. Nguyễn Quang **Chung** (UTEHY)

TS. Lê Văn **Ngọc** (PTIT)

Thành viên

PGS.TS. Tạ Quốc **Bảo** (VNUHCM)

TS. Trần Việt **Anh** (PTIT)

TS. Phạm Thanh **Hiếu** (PTIT)

TS. Nguyễn Thanh **Hồng** (HNUE)

TS. Phạm Văn **Bằng** (UNETI)
TS. Đào Việt **Cường** (UTC)
TS. Bùi Xuân **Diệu** (HUST)
TS. Hoàng Phi **Dũng** (PTIT)
TS. Nguyễn Trung **Dũng** (HPU2)
TS. Nguyễn Anh **Đài** (UTEHY)
TS. Bùi Thị **Giang** (ACTVN)
TS. Mai Thị Ngọc **Hà** (PTIT)
TS. Trịnh Thị Thúy **Hồng** (UTEHY)
TS. Phạm Văn **Hoằng** (VNU-UED)
TS. Phùng Duy **Quang** (FTU)
TS. Ngô Thị Kim **Quy** (PTIT)
TS. Nguyễn Thị Minh **Tâm** (PTIT)
TS. Trần Hồng **Thái** (UTEHY)
TS. Nguyễn Thị **Trang** (PTIT)
TS. Trịnh Xuân **Yến** (UTEHY)

b. Tiểu ban 2: Trí tuệ nhân tạo và Ứng dụng

Trưởng tiểu ban

PGS.TS. Nguyễn Long **Giang** (VAST`)

Đồng trưởng tiểu ban

PGS.TS. Nguyễn Văn **Hậu** (UTEHY)

Thư ký

TS. Chu Bình **Minh** (UNETI)

TS. Đàm Nhân **Bá** (UTEHY)

Thành viên

PGS.TS. Nguyễn Thị Kim **Sơn** (VNU-UET)
TS. Nguyễn Hoàng **Chiến** (UNETI)
TS. Phạm Minh **Chuẩn** (UTEHY)
TS. Trần Thanh **Đại** (UNETI)
TS. Lê Trung **Hiếu** (UTEHY)
TS. Hà Bình **Minh** (HUB)
TS. Phan Đình **Phùng** (HUB)
TS. Nguyễn Văn **Quyết** (UTEYH)
TS. Bùi Văn **Tân** (UNETI)
TS. Chu Bá **Thành** (UTEHY)
TS. Cao Diệp **Thắng** (UNETI)
TS. Hoàng Quốc **Việt** (UTEHY)
TS. Trần Hồng **Việt** (VNU-UET)

c. Tiểu ban 3: Ứng dụng Vật lý trong Khoa học và Công nghệ

Trưởng tiểu ban

GS.TS. Đặng Văn **Soa** (UNETI)

Đồng trưởng tiểu ban

GS.TS. Nguyễn Đức **Chiến** (HUST)

Thư ký

TS. Giáp Văn **Cường** (UTEHY)

TS. Lê Thị Minh **Thanh** (PTIT)

Thành viên

PGS.TS. Nguyễn Xuân **Ca** (TNUS)
PGS.TS. Nguyễn Văn **Hảo** (TNUS)
PGS.TS. Phạm Hồng **Minh** (IOP-VAST)
PGS.TS. Phạm Minh **Tân** (PTIT)
PGS.TS. Tống Sỹ **Tiến** (UFFP)
PGS. TS. Phạm Văn **Vĩnh** (VNU-UET)
TS. Đàm Nhân **Bá** (UTEHY)
TS. Nguyễn Thị **Hân** (UTEHY)
TS. Hoàng Văn **Hán** (UTEHY)
TS. Lê Thị Thu **Hiền** (UTEHY)
TS. Hoàng Thị **Hiến** (UTEHY)
TS. Đào Thị **Hồng** (PTIT)
TS. Nguyễn Thị Thúy **Liễu** (PTIT)
TS. Phạm Thế **Tân** (UTEHY)
TS. Vũ Kim **Thái** (UNETI)
TS. Cao Thị **Thanh** (IMS-VAST)
TS. Tô Thị **Thảo** (PTIT)
TS. Dương Vũ **Trường** (HaUI)

d. Tiểu ban 4: Công nghệ số và phương pháp giảng dạy Toán - Vật lý trong các trường Đại học Kỹ thuật và công nghệ

Trưởng tiểu ban

PGS.TS. Chu Cẩm **Thơ** (Phenikaa-uni)

Thư ký

TS. Lê Xuân **Huy** (UNETI)

Thành viên

PGS.TS. Nguyễn Chí **Thành** (VNU-UED)
PGS.TS. Hoàng Lê **Minh** (HNUE)
TS. Trần Đức **Chiển** (UNETI)
TS. Nguyễn Quang **Chung** (UTEHY)
TS. Nguyễn Thị **Dung** (PTIT)
TS. Nguyễn Anh **Đài** (UTEHY)
TS. Trịnh Thị Thúy **Hồng** (UTEHY)
TS. Lưu Thị **Nhạn** (HaUI)
TS. Lê Thị Minh **Thanh** (PTIT)
TS. Nguyễn Thị **Thu** (PTIT)
TS. Trịnh Xuân **Yến** (UTEHY)
TS. Quách Thị **Sen** (HUP)

LỜI NÓI ĐẦU

Sự bùng nổ của trí tuệ nhân tạo, dữ liệu lớn, điện toán thông minh và các nền tảng số đang làm thay đổi căn bản cách con người nghiên cứu khoa học, sản xuất tri thức và phát triển công nghệ. Trong tiến trình đó, các ngành khoa học cơ bản như Toán học và Vật lý không chỉ giữ vai trò nền tảng mà còn trở thành động lực cốt lõi cho nhiều lĩnh vực công nghệ chiến lược như trí tuệ nhân tạo, khoa học dữ liệu, mô phỏng tính toán, an toàn thông tin, công nghệ bán dẫn và tự động hóa thông minh. Việc kết nối giữa nghiên cứu lý thuyết với các bài toán ứng dụng thực tiễn đang mở ra những hướng tiếp cận mới, góp phần thúc đẩy hệ sinh thái đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia.

Trong bối cảnh đó, Hội thảo quốc gia "Khoa học Tự nhiên và Ứng dụng trong thời đại số - NSA2026" được tổ chức nhằm tạo dựng diễn đàn học thuật chuyên sâu để các nhà khoa học, giảng viên, nghiên cứu sinh và sinh viên trao đổi các kết quả nghiên cứu mới, thảo luận các xu hướng công nghệ hiện đại và tăng cường hợp tác nghiên cứu liên ngành trong thời đại số.

Hội thảo được đồng tổ chức bởi Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên và Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp. Với định hướng đào tạo gắn liền thực tiễn và chuyển đổi số, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp đã và đang đẩy mạnh hoạt động nghiên cứu khoa học, phát triển các nhóm nghiên cứu ứng dụng và thúc đẩy hợp tác học thuật trong các lĩnh vực công nghệ, dữ liệu và trí tuệ nhân tạo.

Tiếp nối thành công của Hội thảo NSA2025, Hội thảo NSA2026 tiếp tục nhận được sự hưởng ứng mạnh mẽ từ cộng đồng học thuật với số lượng công trình gửi tham gia tăng đáng kể. Đặc biệt, năm nay Hội thảo mở rộng thêm tiểu ban "Trí tuệ nhân tạo và Ứng dụng", phản ánh xu hướng phát triển nổi bật của AI trong nghiên cứu khoa học và các bài toán thực tiễn hiện nay.

Kỷ yếu Hội thảo NSA2026 gồm 108 bài báo khoa học được tuyển chọn kỹ lưỡng thông qua hai vòng phản biện độc lập, nghiêm túc và khách quan với sự tham gia của hơn 120 chuyên gia, nhà khoa học đến từ nhiều trường đại học, viện nghiên cứu và cơ sở đào tạo trên cả nước. Các bài báo tập trung vào nhiều hướng nghiên cứu có tính liên ngành và thời sự như mô hình toán học, vật lý ứng dụng, khoa học dữ liệu, học máy, trí tuệ nhân tạo, mô phỏng tính toán, tối ưu hóa và đổi mới phương pháp giảng dạy trong các trường đại học kỹ thuật và công nghệ.

Ban Tổ chức Hội thảo xin trân trọng cảm ơn sự quan tâm, đồng hành và hỗ trợ của các cơ quan quản lý, các tổ chức khoa học, các nhà khoa học, chuyên gia phản biện, tác giả và đại biểu tham dự Hội thảo. Những đóng góp quý báu đó đã góp phần bảo đảm chất lượng học thuật và tạo nên thành công của Hội thảo NSA2026.

Ban Tổ chức hy vọng Hội thảo NSA2026 sẽ tiếp tục là không gian học thuật uy tín để kết nối tri thức, thúc đẩy nghiên cứu liên ngành, lan tỏa tinh thần đổi mới sáng tạo và đóng góp tích cực cho sự phát triển khoa học, công nghệ và chuyển đổi số của Việt Nam trong giai đoạn mới.

Trân trọng cảm ơn sự quan tâm và tham dự của Quý vị!

BAN TỔ CHỨC HỘI THẢO NSA2026

CÁC BÁO CÁO MỜI

I. PHIÊN TOÀN THỂ

(Địa điểm: Hội trường HA10; Chủ tọa: GS.TSKH Vũ Hoàng Linh; GS. TS. Đặng Văn Soa)

Báo cáo mời số 1: *Mô hình hóa toán học và xác định mô hình*

GS.TSKH. Đinh Nho Hào – *Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam* (Thời gian: 8h45-9h15)

Báo cáo mời số 2: *Một số hướng nghiên cứu ứng dụng bức xạ synchrotron và máy gia tốc trong vật lý và khoa học vật liệu tại Việt Nam*

PGS.TS. Trần Hải Đức – *Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội* (Thời gian: 9h15-9h45)

II. PHIÊN TIỂU BAN (Địa điểm: 04 tiểu ban-06 phòng báo cáo song song)

	Tiểu ban 1A: Mô hình thuật toán và ứng dụng ***Chủ tọa: GS.TS. Phạm Ngọc Anh***	**Thời gian**
1.	*Composition operators on spaces of meromorphic functions* **TS. Trịnh Thị Thuý Hồng**	10h00 - 10h30
2.	*Viscosity technique and inexact projection method for solving variational inequality problems* **NCS. Cao Thị Thu Trang**	10h30 - 11h00
3.	*Proximity-based adaptive step sizes for multi-agent reinforcement learning in variational inequality problems with rotational dynamics* **TS. Phạm Thanh Hiếu**	11h00 - 11h30
4.	*Mô hình hóa và điều khiển tối ưu mô-men theo dòng điện cho động cơ ipmsm ứng dụng trong xe điện* **NCS. Phạm Thị Giang**	11h30 - 12h00
	Tiểu ban 1B: Mô hình thuật toán và ứng dụng ***Chủ tọa: PGS.TS. Hà Tiến Ngoạn***	
5.	*Nghiệm nhẹ của một lớp phương trình vi -tích phân volterra phân thứ trên không gian các hàm bị chặn liên tục đều* **NCS. Nguyễn Hồng Vân**	10h00 - 10h30
6.	*Conditions for the existence of solutions for partial neutral functional differential equations* ***TS. Trịnh Xuân Yến***	10h30 - 11h00
7.	*Ngưỡng lây nhiễm của một số mô hình đặc biệt cho sự lan truyền thông tin trên mạng phức hợp*	11h00 - 11h30

	TS. Hoàng Phi Dũng	
8.	*Một phân phối tựa-gaussian rời rạc và ứng dụng trong mật mã dựa trên lưới* **TS. Phạm Bá Đức**	11h30 - 12h00
	Tiểu ban 2A: Trí tuệ nhân tạo và Ứng dụng ***Chủ tọa: PGS.TS. Nguyễn Long Giang***	
9.	*M-GEEMS Multisource Gloss-based Multi-view Modeling for Semantic Concept Similarity* **TS. Bùi Văn Tân**	10h00 - 10h30
10.	*On-device Evaluation of Quantization Techniques for Multi-task Deep Learning Models on STM32 Microcontrollers* **TS. Lê Minh Huy**	10h30 - 11h00
11.	*Một phương pháp dự đoán gen mục tiêu điều trị ung thư trên các mạng sinh học* **TS. Phạm Đức Tĩnh**	11h00 - 11h30
12.	*Evaluating Explainable AI Techniques on Tabular Data: A Comparative Study of LIME and SHAP in Healthcare and Finance* **NCS. Nguyễn Việt Nhật**	11h30 - 12h00
	Tiểu ban 2B: Trí tuệ nhân tạo và Ứng dụng ***Chủ tọa: PGS.TS. Nguyễn Văn Hậu***	**Thời gian**
13.	*MASLS: Mô hình khai phá dữ liệu không gian - thời gian từ bẫy côn trùng thông minh và vi khí hậu trong cảnh báo sớm dịch hại lúa* **TS. Lê Văn Vịnh**	10h00 - 10h30
14.	*Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong quản lý giáo dục nhằm phát hiện sớm trầm cảm học sinh sinh viên tỉnh Bắc Ninh* **ThS. Nguyễn Huy Hòa**	10h30 - 11h00
15.	*Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong phân khúc khách hàng bán lẻ điện tử: Kết hợp mô hình RFM và thuật toán K-means* **TS. Dương Thị Hoàn**	11h00 - 11h30
16.	*Phát triển hệ thống phát hiện cháy sớm thông minh sử dụng ESP32-CAM và AI tại biên* **Lê Văn Hạnh**	11h30 - 12h00
	Tiểu ban 03: Ứng dụng Vật lý trong Khoa học Công nghệ ***Chủ tọa: GS.TS. Đặng Văn Soa; GS.TS. Nguyễn Đức Chiến***	
17.	*Tuning the Photoluminescence properties of Cu-doped CDSSE alloyed quantum dots by controlling reaction time* **NCS. Nguyễn Thị Thu Hoàn**	10h00 - 10h30
18.	*Áp suất của khí Bose đồng nhất* **TS. Vũ Kim Thái**	10h30 - 11h00

19.	*Sự chuyển pha cấu trúc và tính chất quang của vật liệu 0,7BiFe1-xNixO3-0,3BaTiO₃* **TS. Nguyễn Ngọc Minh**	11h00 - 11h30
20.	*Optical excitations of silicon carbide monolayer: insights from first-principles modeling* **TS. Nguyễn Thị Hân**	11h30 - 12h00
	Tiểu ban 04: Phương pháp giảng dạy Toán - Vật lý trong các trường Đại học Kỹ thuật và Công nghệ ***PGS.TS. Chu Cẩm Thơ***	
21.	*Xây dựng hệ thống đo lường năng lực "Ai teaming" trong kiểm định Abet: trường hợp các môn toán ở bậc đại học khối ngành công nghệ kỹ thuật* **TS. Nguyễn Thị Ngọc Anh**	10h00 - 10h30
22.	*Dạy học giải tích ở các trường đại học khối ngành kĩ thuật theo hướng hỗ trợ sinh viên thực hiện các hoạt động tóm tắt* **TS. Nguyễn Thị Dung**	10h30 - 11h00
23.	*Rào cản nhận thức trong chuyển đổi từ ngôn ngữ toán học sang lập trình của sinh viên ngành khoa học dữ liệu* **ThS. Lê Lệ Hằng**	11h00 - 11h30
24.	*Ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) trong giảng dạy môn Vật lý kỹ thuật tại Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên* **TS. Giáp Văn Cường**	11h30 - 12h00

MỤC LỤC

Bài báo **Trang**

PHẦN 1: MÔ HÌNH, THUẬT TOÁN VÀ ỨNG DỤNG

[1] TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU CHO BÀI TOÁN ĐỊNH GIÁ ĐỘNG VỚI MÔ HÌNH HYBRID PPO–GA DỰA TRÊN PARETO
Lê Hằng Anh, Lê Lệ Hằng 2

[2] MỘT PHÂN PHỐI TỰA-GAUSSIAN RỜI RẠC VÀ ỨNG DỤNG TRONG MẬT MÃ DỰA TRÊN LƯỚI
Phạm Bá Đức 13

[3] A NEW ALGORITHM FOR SPLIT EQUILIBRIUM PROBLEM WITH MULTIPLE OUTPUT SETS
Mai Thi Ngoc Ha 23

[4] CONDITIONS FOR EXISTENCE OF SOLUTIONS FOR PARTIAL NEUTRAL FUNCTIONAL DIFFERENTIAL EQUATIONS
Nguyễn Thị Thu Hằng, Trịnh Xuân Yến 35

[5] PROXIMITY-BASED ADAPTIVE STEP SIZES FOR MULTI-AGENT REINFORCEMENT LEARNING IN VARIATIONAL INEQUALITY PROBLEMS WITH ROTATIONAL DYNAMICS
Pham Thanh Hieu 43

[6] BẤT ĐẲNG THỨC CHUẨN TRONG $L_2(\mathbb{R}_+)$ ĐỐI VỚI TOÁN TỬ TÍCH CHẬP SUY RỘNG FOURIER COSINE-LAPLACE VÀ ỨNG DỤNG
Phạm Văn Hoằng, Lê Xuân Huy, Đỗ Trần Ngân Hà 54

[7] COMPOSITION OPERATORS ON SPACES OF MEROMORPHIC FUNCTIONS
Trinh Thi Thuy Hong 61

[8] A SADDLE POINT APPROACH FOR WEIGHTED SEMILINEAR ELLIPTIC NEUMANN PROBLEMS AT RESONANCE
Bui Quoc Hung 67

[9] PHƯƠNG PHÁP DƯỚI ĐẠO HÀM MỚI GIẢI BÀI TOÁN BẤT ĐẲNG THỨC BIẾN PHÂN
Nguyễn Văn Huynh 81

[10] DỰ ĐOÁN XU HƯỚNG BIẾN ĐỘNG GIÁ CỔ PHIẾU AAPL DỰA TRÊN MÔ HÌNH HỒI QUY LOGISTIC VÀ CÁC CHỈ BÁO KỸ THUẬT
Nguyễn Thị Hạnh Lê 90

[11] RECURSIVE AND INTEGRAL EQUATIONS FOR RUIN PROBABILITY IN AN AUTOREGRESSIVE DEPENDENCE STRUCTURE MODEL
Tran Thi Hai Ly, Nguyen Quang Chung 100

[12] BOUNDARY CONTROL PROBLEM FOR LINEAR ELASTIC EQUATION
Ta Thi Thanh Mai, Bui Manh Tien, Mai Thi Tuyet Nhung 106

[13] MEAN-SQUARE EXPONENTIAL STABILITY OF SWITCHED LINEAR SYSTEMS VIA STOCHASTIC AVERAGE DWELL-TIME
Le Van Ngoc 116

[14] PHYSICS-INFORMED NEURAL NETWORKS FOR SOLVING NONLINEAR PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS: A STUDY ON BURGERS' EQUATION
Nguyen Thanh Quang, Bui Xuan Dieu, Nguyen Canh Nam 122

[15] EXISTENCE RESULTS OF A NONLINEAR SECOND ORDER DIFFERENTIAL EQUATION WITH TWO INTEGRAL BOUNDARY CONDITIONS
Ngo Thị Kim Quy 131

[16] DỰ BÁO NGẮN HẠN SẢN LƯỢNG ĐIỆN QUANG QUANG ĐIỆN DỰA TRÊN MÔ HÌNH PHÂN TÁCH CHẾ ĐỘ VẬN HÀNH VÀ HỢP NHẤT MỀM
Phạm Ngọc Sâm 141

[17] MÔ HÌNH HỆ THỐNG SOS THEO KIẾN TRÚC LOCAL-FIRST VÀ ĐÁNH GIÁ ĐỘ TRỄ XỬ LÝ SỰ KIỆN
Cao Diệp Thắng 155

[18] NGHIÊN CỨU SO SÁNH TỐC ĐỘ HỘI TỤ CỦA CLT VÀ BOOTSTRAP THEO QUY MÔ MẪU TRÊN DỮ LIỆU MÔ PHỎNG VÀ THỰC TẾ
Trần Thị Kim Thanh 165

[19] ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN CHO BÀI TOÁN N:M PERMANENT TRONG PHÂN CÔNG HẠNG MỤC CỦA CÔNG TY XÂY DỰNG NASACO NĂM 2026
Ngô Thị Toán 176

[20] VISCOSITY TECHNIQUE AND INEXACT PROJECTION METHOD FOR SOLVING VARIATIONAL INEQUALITY PROBLEMS
Cao Thị Thu Trang, Hồ Phi Tứ 184

[21] FINITE-TIME STABILIZATION CONTROL FOR UNCERTAIN POLYTOPIC TEMPERED CAPUTO FRACTIONAL-ORDER SYSTEMS WITH DELAY
Tran Ngoc Tuan, Nguyen Thi Huong Giang, Nguyen Thi Thu Hang, Dang Thi Hoi 194

[22] NGHIỆM NHẸ CỦA MỘT LỚP PHƯƠNG TRÌNH VI – TÍCH PHÂN VOLTERRA PHÂN THỨ TRÊN KHÔNG GIAN CÁC HÀM BỊ CHẶN LIÊN TỤC ĐỀU
Nguyễn Hồng Vân, Nguyễn Như Thắng, Phạm Văn Hoằng, Lê Xuân Huy 203

[23] RESEARCH AND OPTIMIZATION OF TWISTED EDWARDS CURVE PARAMETERS FOR SECURE DIGITAL SIGNATURE SYSTEMS
Nguyen Viet Nhat, Nguyen Quang Minh, Tran Nhat Minh, Nguyen Van Nam 212

[24] NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ MÁY BIẾN ÁP LỰC TRÊN CƠ SỞ THUẬT TOÁN TỐI ƯU HÓA BẦY ĐÀN
Trần Đức Chuyển, Phan Hoài Nam 219

[25] ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI DỰA TRÊN MẠNG NƠ-RON BÙ VÙNG CHẾT CHO XE HAI BÁNH TỰ CÂN BẰNG
Nguyễn Đức Điển, Trần Đình Hiệp 230

[26] ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT VỚI LUẬT TIẾP CẬN CẢI TIẾN CHO HỆ CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG GIÓ SỬ DỤNG MÁY PHÁT ĐIỆN ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU
Đặng Quốc Du 242

[27] NGHIÊN CỨU MÔ HÌNH TỐI ƯU HÓA ĐỘ NHÁM BỀ MẶT KHI MÀI HỢP KIM TI TAN TI6AL4V
Phạm Vũ Dũng 253

[28] NGƯỠNG LÂY NHIỄM CỦA MỘT SỐ MÔ HÌNH ĐẶC BIỆT CHO SỰ LAN TRUYỀN THÔNG TIN TRÊN MẠNG PHỨC HỢP
Hoàng Phi Dũng 262

[29] ĐIỀU HƯỚNG TỰ ĐỘNG TRONG MÔI TRƯỜNG ĐỘNG SỬ DỤNG THUẬT TOÁN THETA KẾT HỢP VỚI ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO MÔ HÌNH THÍCH NGHI
Đặng Tiến Dũng, Cao Văn Hào, Ngô Bình An, Vũ Ngọc Diệp, An Thị Hoài Thu Anh 274

[30] GIẢI PHÁP NÂNG CAO KHẢ NĂNG ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG TÊN LỬA CHỐNG LẠI MỤC TIÊU CƠ ĐỘNG CAO
Nguyễn Đức Dương, Ngô Văn Dũng 285

[31] MÔ HÌNH HÓA VÀ ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU MÔ-MEN THEO DÒNG ĐIỆN CHO ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU NAM CHÂM CHÌM ỨNG DỤNG TRONG XE ĐIỆN
Phạm Thị Giang, Đào Hồng Hải, Hán Ngọc Giáp 294

[32] ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG CÓ BÙ NHIỄU CHO ROBOT BÁNH MECANUM SỬ DỤNG ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT ĐÁP ỨNG THỜI GIAN HỮU HẠN KHÔNG SUY BIẾN KẾT HỢP BỘ QUAN SÁT NHIỄU PHI TUYẾN KIỂU CHEN
Hà Huy Giáp, Mai Văn Duy 305

[33] ĐIỀU KHIỂN VỊ TRÍ QUADROTOR SỬ DỤNG BACKSTEPPING KẾT HỢP ƯỚC LƯỢNG NHIỄU DỰA TRÊN XẤP XỈ GIA TỐC THEO SAI PHÂN EULER
Nguyễn Thị Hiên, Võ Thu Hà 317

[34] NÂNG CAO HIỆU QUẢ NHẬN DẠNG RÁC THẢI ĐIỆN TỬ THỜI GIAN THỰC BẰNG MÔ HÌNH LAI YOLO26S–CONVNEXT
Doãn Thị Thúy Hiền, Hà Thị Thanh, Doãn Hoài Nam 329

[35] ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING KÍCH HOẠT SỰ KIỆN KẾT HỢP HỌC TĂNG CƯỜNG CHO BÀI TOÁN BÁM QUỸ ĐẠO ROBOT DI ĐỘNG
Doãn Văn Hóa, Trần Đức Chuyển 341

[36] TỐI ƯU HÓA DỰ ĐOÁN THÔI HỌC CỦA SINH VIÊN TRÊN DỮ LIỆU MẤT CÂN BẰNG TIẾP CẬN SMOTE-TOMEK VÀ GIẢI THÍCH MÔ HÌNH BẰNG SHAP
Nguyễn Văn Hòa, Nguyễn Huy Hòa, Nguyễn Ngọc Bắc, Hoàng Sỹ Việt, Phùng Thị Linh, Hồ Thị Minh Hằng 352

[37] XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN HỌC ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN ĐỘ CHÍNH XÁC ĐƯỜNG KÍNH ỐNG TRONG QUÁ TRÌNH HÀN ỐNG GIÓ XOẮN
Nguyễn Thành Huân, Trần Hồng Sơn 364

[38] KHUNG ĐIỀU HƯỚNG LAI DỰA TRÊN MPC NHẬN THỨC RỦI RO VÀ CHUYỂN ĐỔI THÍCH NGHI
Trần Thị Hường, Trần Thị Thu Huyền 374

[39] PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN GIẢI BÀI TOÁN ĐIỆN TỪ TRƯỜNG
Tạ Thị Thanh Mai, Nguyễn Việt Anh 384

[40] MÔ HÌNH HÓA VÀ TỐI ƯU CHẾ ĐỘ CẮT QUÁ TRÌNH PHAY SỬ DỤNG DAO CẦU THÉP TÔI CỨNG BẰNG THUẬT TOÁN NSGA-II
Nguyễn Văn Mùi, Triệu Quý Huy 396

[41] ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN K-MEANS TỐI ƯU HÓA VỊ TRÍ TRẠM SẠC XE ĐIỆN (EV) DỰA TRÊN MẬT ĐỘ GIAO THÔNG VÀ PHÂN BỐ DÂN CƯ
Lê Thị Kiều Oanh, Vũ Mỹ Hạnh 404

[42] ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN TỐI ƯU BỘ ĐIỀU KHIỂN PID CÓ TÁCH KÊNH CHO HỆ THỐNG ỔN ĐỊNH NHIỆT ĐỘ VÀ MỨC NƯỚC TRONG BỒN TRỘN NHIỆT
Trần Ngọc Sơn, Nguyễn Đức Điển, Phạm Văn Huy, Trần Đình Hiệp 414

[43] PHÂN TÍCH DỮ LIỆU ÂM THANH MÔI TRƯỜNG CHO PHÁT HIỆN BẤT THƯỜNG DỰA TRÊN HỌC MÁY
Nguyễn Thiên Tân, Ngô Duy Tân, Phạm Duy Phong 425

[44] NÂNG CAO HIỆU QUẢ PHÁT HIỆN CHÁY RỪNG SỚM ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO KẾT HỢP ĐỘI HÌNH UAV TÍCH HỢP ĐA CẢM BIẾN THÔNG MINH ĐƯỢC PHÂN BỔ BẰNG THUẬT TOÁN K-MEANS
Lê Văn Vịnh, Phạm Văn Tùng, Nguyễn Quang Chiến, Kim Ngọc Bách 438

[45] IMPROVING THE DYNAMIC WINDOW APPROACH VIA SEQUENTIAL QUADRATIC PROGRAMMING FOR SMOOTH MOBILE ROBOT MOTION PLANNING
Cao Thị Thanh Xuân, Ngô Trí Nam Cường, Lê Thái An, Mai Thế Anh 448

PHẦN 2: TRÍ TUỆ NHÂN TẠO VÀ ỨNG DỤNG

[46] M-GEEMS: MULTISOURCE GLOSS-BASED MULTI-VIEW MODELING FOR SEMANTIC CONCEPT SIMILARITY
Van-Tan Bui, Van-Huy Pham, Van-Vinh Nguyen, Hong-Viet Tran, Hoang-Vu Trinh 460

[47] A HYBRID MULTIMODAL FRAMEWORK FOR PHISHING DETECTION USING OCR AND MULTILINGUAL BERT
Nguyen Viet Nhat, Le Thi Thuy Duong, Pham Tran Minh Duc, Pham Ngoc Quan 471

[48] VC-STS: A LARGE-SCALE BENCHMARK AND CONTRASTIVE LEARNING APPROACH FOR VIETNAMESE–CHINESE SEMANTIC TEXTUAL SIMILARITY
Do-Truong Nguyen, Thi-Mung Le, Van-Tan Bui, Huu-Anh Tran, Thi-Hoa Bui, Thi-Thu-Huong Tran, Trung-Tien Nguyen 479

[49] CAPS-K: REVERSIBLE ENTERPRISE PROMPT TRANSFORMATION FOR CLOUD LARGE LANGUAGE MODELS WITH GRAPH-AWARE k-INDISTINGUISHABLE CONTEXT CAPSULES
Truong Xuan Tran, Cuong Le, Phong Hai Bui 489

[50] CACL: LEARNING CONDITION-AWARE SEMANTIC MAPPINGS VIA ADAPTIVE CONTRASTIVE LEARNING
Van-Tan Bui, Thi-Hoa Bui, Tuan-Nam Doan, Thi-Hong-Ha Dien, Thi-Mung Le 502

[51] EVALUATING EXPLAINABLE AI TECHNIQUES ON TABULAR DATA: A COMPARATIVE STUDY OF LIME AND SHAP IN HEALTHCARE AND FINANCE
Nguyen Viet Nhat, Tran Quoc Hung, Trương Tuan Anh, Lam Quang Huy 512

[52] ON-DEVICE EVALUATION OF QUANTIZATION TECHNIQUES FOR MULTI-TASK DEEP LEARNING MODELS ON STM32 MICROCONTROLLERS
Le Lan Chi, Xuanque Nguyen, Minhhuy Le 523

[53] TIỀM NĂNG ỨNG MÔ HÌNH NGÔN NGỮ LỚN TRONG BÀI TOÁN PHÂN LOẠI CHUỖI THỜI GIAN
Trần Bảo Trung 534

[54] ỨNG DỤNG MÔ HÌNH NGÔN NGỮ LỚN TRONG GIẢI BÀI TẬP XÁC SUẤT THỐNG KÊ
Trần Quốc Hưng, Trần Bảo Trung, Trần Đức Lương, Lưu Nhật Nam, Lê Đình Tùng, Nguyễn Trần Quang Minh 546

[55] XẤP XỈ GRADIENT BẰNG SAI PHÂN TRUNG TÂM VÀ NGOẠI SUY RICHARDSON TRONG HUẤN LUYỆN MÔ HÌNH HỌC MÁY
Nguyễn Mai Quyên, Hà Bình Minh, Phan Đình Phùng, Chu Bình Minh, Trần Hoàng Bách, Lê Danh Quân 556

[56] TỪ MODEL-CENTRIC ĐẾN DATA-CENTRIC: ĐỀ XUẤT KHUNG LÝ THUYẾT BỐN TRỤ CỘT CHO KHOA HỌC DỮ LIỆU
Nguyễn Huy Hòa, Nguyễn Hoàng Lê Thu, Nguyễn Huy Bách, Phùng Thị Hương Trang 567

[57] MỘT PHƯƠNG PHÁP DỰ ĐOÁN GEN MỤC TIÊU ĐIỀU TRỊ UNG THƯ TRÊN CÁC MẠNG SINH HỌC
Đỗ Triệu Đức Phương, Trịnh Thanh Quân, Phan Quang Thịnh, Phạm Đức Tĩnh 578

[58] MỘT SỐ MÔ HÌNH PHÂN TÍCH ẢNH Y TẾ DỰA TRÊN HỌC SÂU
Nguyễn Anh Thư 587

[59] ĐÁNH GIÁ RỐI LOẠN TRẦM CẢM MDD VÀ CHỨNG NGƯNG THỞ KHI NGỦ DO TẮC NGHẼN OSA QUA TÍN HIỆU ECG VÀ PPG
Bùi Huy Hải 600

[60] ỨNG DỤNG MÔ HÌNH HỌC SÂU VÀ HỌC MÁY ĐA BƯỚC DỰ BÁO PHỤ TẢI NGÀY KẾ TIẾP TRONG HỆ THỐNG NĂNG LƯỢNG PHÂN TÁN
Phạm Ngọc Sâm, Đỗ Quang Hiệp 607

[61] ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG GIÁM SÁT VÀ PHÁT HIỆN NGUY CƠ SỚM TIÊU THỤ ĐIỆN NĂNG THEO THỜI GIAN THỰC CHO HỆ THỐNG CẦU TRỤC CÔNG NGHIỆP
Đinh Thị Hằng, Trần Đức Nam, Hoàng Văn Toàn 618

[62] PHÁT HIỆN BẤT THƯỜNG TRONG DỮ LIỆU IoT THỜI GIAN THỰC BẰNG ĐẶC TRƯNG CỬA SỔ TRƯỢT VÀ MỘT SỐ MÔ HÌNH HỌC MÁY
Cao Diệp Thắng, Phạm Thị Trà Giang, Trần Trọng Chinh 629

[63] PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG PHÁT HIỆN CHÁY SỚM THÔNG MINH SỬ DỤNG ESP32-CAM VÀ AI TẠI BIÊN
Nguyễn Công Anh, Lê Văn Hạnh 638

[64] KIẾN TRÚC HỆ THỐNG CẢNH BÁO LŨ SỚM TÍCH HỢP TRÍ TUỆ NHÂN TẠO VÀ TRUYỀN THÔNG ĐA KÊNH TRONG HỆ SINH THÁI SỐ
Nguyễn Thu Hiền, Nguyễn Việt Anh, Phạm Trần Ngọc Chiến 650

[65] NGHIÊN CỨU VÀ ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG ĐIỀU CHỈNH ĐÈN GIAO THÔNG THEO LƯU LƯỢNG PHƯƠNG TIỆN
Kim Ngọc Bách, Lê Văn Vịnh, Hà Như Thái, Lê Minh Quang, Phạm Gia Huy 662

[66] NGHIÊN CỨU KẾT HỢP GIẢI THUẬT DI TRUYỀN VÀ PHƯƠNG PHÁP HỌC SÂU TĂNG CƯỜNG ĐỂ CẢI TIẾN LỰA CHỌN THAM SỐ NHẰM NÂNG CAO HIỆU QUẢ HOẠCH ĐỊNH LỘ TRÌNH VẬN CHUYỂN
Cao Ngọc Ánh, Trần Bích Thảo 673

[67] XE TỰ HÀNH ĐIỀU HƯỚNG TỰ TRỊ BẰNG LIDAR ĐỂ NHẬN DIỆN KHUÔN MẶT ỨNG DỤNG HỌC SÂU
Đậu Đức Lưu, Ngô Quang Trí, Lại Thế Trường, Đào Hoàng An, Lương Thị Thảo Hiếu 682

[68] ỨNG DỤNG DETECTION TRANSFORMER TRONG PHÁT HIỆN SỚM SÂU BỆNH TRÊN CÂY TRỒNG
Lê Hằng Anh, Hồ Thị Minh Hằng, Phùng Thị Linh 694

[69] MASLS: MÔ HÌNH KHAI PHÁ DỮ LIỆU KHÔNG GIAN - THỜI GIAN TỪ BẪY CÔN TRÙNG THÔNG MINH VÀ VI KHÍ HẬU TRONG CẢNH BÁO SỚM DỊCH HẠI LÚA
Lê Văn Vịnh, Đoàn Văn Nam, Kim Ngọc Bách 708

[70] ỨNG DỤNG MÔ HÌNH HỌC SÂU ĐỂ PHÁT HIỆN HÀNG GIẢ TRÊN SÀN THƯƠNG MẠI ĐIỆN TỬ: NGHIÊN CỨU THỬ NGHIỆM TRÊN SẢN PHẨM GIÀY
Nguyễn Bình Minh An, Vũ Thị Hồng Ánh, Nguyễn Thị Huyền Dịu, Nguyễn Thị Hương Giang, Nguyễn Thị Thanh Huyền 717

[71] PHƯƠNG PHÁP TIỀN XỬ LÝ VÀ TRÍCH XUẤT ĐẶC TRƯNG TỪ DỮ LIỆU GIAO DỊCH POS GIÚP CẢI THIỆN DỰ BÁO DOANH THU CHO MỌI MÔ HÌNH: NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM TRÊN HỆ THỐNG SAAS ĐA CỬA HÀNG
Nguyễn Văn Nhất, Lê Văn Vịnh, Khổng Văn Quảng, Kim Ngọc Bách, Nguyễn Văn Điệp 727

[72] ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG PHÂN KHÚC KHÁCH HÀNG BÁN LẺ ĐIỆN TỬ: KẾT HỢP MÔ HÌNH RFM VÀ THUẬT TOÁN K-MEANS
Dương Thị Hoàn, Đào Thị Ngọc Mai, Đỗ Thị Hồng Thơm, Nguyễn Thuỳ Linh, Lương Hoàng Mai, Nguyễn Thị Hải Ly 737

[73] NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP TÍCH HỢP TÍNH NĂNG GỢI Ý LỰA CHỌN BIỂU ĐỒ TRỢ GIÚP NGƯỜI DÙNG KHÔNG CHUYÊN
Vũ Mỹ Hạnh, Lê Thị Kiều Oanh 749

[74] XÂY DỰNG THUẬT TOÁN GỢI Ý HỌC LIỆU SỐ TRONG HỆ THỐNG LMS TẠI TRƯỜNG ĐẠI HỌC
Trịnh Thị Phú, Trần Minh Ngọc 761

[75] ỨNG DỤNG MÔ HÌNH HỌC SÂU NHẬN DẠNG VÀ DỊCH NGÔN NGỮ KÝ HIỆU SANG VĂN BẢN TIẾNG VIỆT
Nguyễn Khang, Lê Thị Lan, Trần Chí Lê 770

[76] TRÍ TUỆ NHÂN TẠO - ĐỔI MỚI PHƯƠNG PHÁP DẠY - HỌC ĐẠI HỌC Ở VIỆT NAM
Nguyễn Thị Hiền Oanh 776

[77] ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG QUẢN LÝ GIÁO DỤC NHẰM PHÁT HIỆN SỚM TRẦM CẢM HỌC SINH SINH VIÊN TỈNH BẮC NINH
Trần Hoàng Long, Nguyễn Huy Hòa, Nguyễn Văn Hòa, Nguyễn Anh Tuấn, Hoàng Anh Tuấn, Lại Thị Nguyệt 786

[78] NĂNG LỰC SỐ VÀ HIỆU QUẢ HỌC TẬP CỦA SINH VIÊN KHỐI NGÀNH KINH TẾ: VAI TRÒ TRUNG GIAN CỦA NĂNG LỰC TỰ HỌC VÀ THÍCH ỨNG
Trần Đức Hòa, Nguyễn Huy Hòa, Lê Anh Dũng, Phạm Phú Thịnh, Vương Văn Khải 797

PHẦN 3: ỨNG DỤNG VẬT LÝ TRONG KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

[79] SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF POLYPYRROLE FILMS WITH DIFFERENT NANOSTRUCTURES
Bui Ha Trung, Hoang Thi Hien 809

[80] TEMPERATURE-DEPENDENT XAFS PARAMETERS OF DIAMOND-TYPE CRYSTALS: VALIDITY RANGE OF THE CLASSICAL STATISTICAL APPROACH
Tong Sy Tien, Pham Thuy Nga, Vu Thi Kim Lien, Nguyen Thi Minh Thuy 815

[81] PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF FERROELECTRIC BNKT THIN FILM
Thu-Hien Vu, Nguyen Ngoc Minh, Ngo Duc Quan 825

[82] LOW-TEMPERATURE PHOTOLUMINESCENCE QUENCHING IN CdSe/CdSeS TETRAPOD-QUANTUM WELL STRUCTURES
Nguyen Thi Thuy Lieu 832

[83] OPTICAL EXCITATIONS OF SILICON CARBIDE MONOLAYER: INSIGHTS FROM FIRST-PRINCIPLES MODELING
Nguyen Thi Han 842

[84] THEORETICAL INSIGHTS INTO STRUCTURAL AND ELECTRONIC PROPERTIES OF THE GRAPHENE–GATE SYSTEM
Nguyen Thi Han, Le Anh Trung, Dam Nhan Ba, Hoang Van Han, Do Thi Hue 851

[85] FABRICATION AND STUDY OF THE STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF Eu3+-DOPED CaF2 NANOCRYSTALS
V. X. Phuc, N. X. Ca, P. V. Do, P. M. Tan, D. T. Chi, D. T. Huong, N. T. Ngoc, T. N. Mai, N. T. M. Thuy 858

[86] MICRO-PHASE SEPARATION AND ION-CONDUCTION SPACE IN SODIUM SILICATE GLASSES: A MOLECULAR DYNAMICS STUDY
Pham Thi Lien 867

[87] TUNING THE PHOTOLUMINESCENCE PROPERTIES OF CU-DOPED CDSSE ALLOYED QUANTUM DOTS BY CONTROLLING REACTION TIME
Nguyen Thi Thu Hoan, Pham Duc Anh, Nguyen Van Truong, Nguyen Xuan Ca, Nguyen Thi Thu Oanh, Pham Van Duong, Dao Thi Hong, Pham Minh Tan 876

[88] VẬT LÍ VÀ TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG KỶ NGUYÊN DỮ LIỆU: XU HƯỚNG NGHIÊN CỨU VÀ ĐỊNH HƯỚNG ĐÀO TẠO TÍCH HỢP VẬT LÍ – TRÍ TUỆ NHÂN TẠO
Nguyễn Thị Kim Chung 887

[89] ÁP SUẤT CỦA KHÍ BOSE ĐỒNG NHẤT
Vũ Kim Thái, Đặng Thị Minh Huệ 894

[90] ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO THIẾT KẾ CHƯƠNG TRÌNH ĐÀO TẠO VẬT LÝ CHO NGÀNH CÔNG NGHỆ VI MẠCH BÁN DẪN
Lê Thị Minh Thanh 900

[91] ẢNH HƯỞNG CỦA TẠP Fe LÊN CẤU TRÚC VÀ TÍNH CHẤT QUANG CỦA VẬT LIỆU $0.7BiFeO_3$-$0.3BaTiO_3$
Nguyễn Thị Thu, Đặng Đức Dũng, Ngô Đức Quân 909

[92] CHẾ TẠO VÀ NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT CỦA MÀNG MỎNG Ni-Al_2O_3
Lưu Văn Thiêm 917

[93] ẢNH HƯỞNG CỦA MẤT CÂN BẰNG KHỐI LƯỢNG LÊN NHIỆT ĐỘ LÊN NHIỆT ĐỘ CHUYỂN PHA TRẠNG THÁI NGƯNG TỤ POLARITON TRONG VI HỐC BÁN DẪN
Nguyễn Thị Hậu 923

[94] TỔNG HỢP XANH CỦA PHỨC HỆ NANO BẠC - DỊCH CHIẾT XÁO TAM PHÂN VÀ NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT QUANG CỦA CHÚNG
Phạm Thế Tân, Nguyễn Thị Thanh, Lê Phương Thảo, Nguyễn Văn Hảo 930

[95] ỔN ĐỊNH ĐỘNG LỰC CỦA HỖN HỢP KHÍ BOSE-FERMI Ở NHIỆT ĐỘ CỰC THẤP
Vũ Thị Hồng Nga 941

[96] ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CỦA MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH BIÊN NGANG PHỔ BIẾN TRONG PHÂN TÍCH TÀI LIỆU TRỌNG LỰC KHU VỰC QUẦN ĐẢO TRƯỜNG SA VIỆT NAM
Bùi Thị Huế 947

[97] SỰ CHUYỂN PHA CẤU TRÚC VÀ TÍNH CHẤT QUANG CỦA VẬT LIỆU $0,7BiFe_{1-x}Ni_xO_3$-$0,3BaTiO_3$
Nguyễn Ngọc Minh, Phạm Văn Tuấn, Vũ Thu Hiền, Ngô Đức Quân 957

[98] NGHIÊN CỨU CẤU TRÚC THỦY TINH SILICA SiO2 PHA TẠP ERBIUM BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐỘNG LỰC HỌC PHÂN TỬ
Tô Thị Thảo 964

[99] NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VẬT LIỆU QUANG XÚC TÁC SnO_2 ĐỒNG PHA TẠP VỚI Bi^{3+} và Ag^+
Lê Thị Thu Hiền, Phạm Văn Tuấn 971

[93] ẢNH HƯỞNG CỦA MẤT CÂN BẰNG KHỐI LƯỢNG LÊN NHIỆT ĐỘ LÊN NHIỆT ĐỘ CHUYỂN PHA TRẠNG THÁI NGƯNG TỤ POLARITON TRONG VI HỐC BÁN DẪN

Nguyễn Thị Hậu[1,2*]

[1]*Trường Đại học Mỏ - Địa chất*

[2]*Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam*

** nguyenthihau@humg.edu.vn*

Tóm tắt:

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của mất cân bằng khối lượng điện tử–lỗ trống lên nhiệt độ chuyển pha trạng thái ngưng tụ polariton trong vi hốc bán dẫn, thông qua các tham số trật tự trạng thái ngưng tụ exciton và photon. Các tham số trật tự trạng thái ngưng tụ exciton và photon được tính toán giải tích bằng phương pháp gần đúng Hartree-Fock. Kết quả tính số cho thấy nhiệt độ chuyển pha T_c tăng theo t^h trong vùng t^h nhỏ nhưng giảm trong vùng t^h lớn. Hệ chủ yếu tồn tại trong pha ngưng tụ polariton và xuất hiện thêm pha photon-like polariton khi t^h tăng. Phổ năng lượng của các giả hạt fermion mới cho thấy khe năng lượng xuất hiện khi các tham số trật tự trạng thái ngưng tụ khác không.

Từ khóa: *vi hốc bán dẫn, gần đúng Hartree-Fock, lý thuyết trường trung bình, ngưng tụ Bose-Einstein.*

1. Đặt vấn đề

Exciton-polariton (hay còn gọi là polariton) là giả hạt boson hình thành từ liên kết mạnh giữa exciton trong giếng lượng tử và photon trong cấu trúc vi hốc. Nhờ khối lượng hiệu dụng rất nhỏ, hệ polariton có thể xảy ra ngưng tụ Bose–Einstein (BEC) ở nhiệt độ tương đối cao, thậm chí là nhiệt độ phòng, qua đó mở ra nhiều triển vọng ứng dụng trong quang học hiện đại, linh kiện quang–điện tử, thông tin lượng tử, … [1-4].

Về phương diện lý thuyết, đã có nhiều công trình tập trung nghiên cứu các đặc trưng của trạng thái ngưng tụ cũng như giản đồ pha của hệ polariton, chủ yếu dựa trên các cách tiếp cận gần đúng trường trung bình như Hartree–Fock [5-8]. Các nghiên cứu này đã cung cấp những hiểu biết quan trọng về cơ chế hình thành trạng thái ngưng tụ, sự cạnh tranh giữa các thành phần exciton và photon, cũng như sự phụ thuộc của các đại lượng đặc trưng vào các tham số của hệ. Tuy nhiên, trong phần lớn các mô hình đã công bố, khối lượng của điện tử và lỗ trống thường được giả thiết bằng nhau nhằm đơn giản hóa bài toán. Giả thiết này tuy thuận tiện về mặt tính toán nhưng chưa phản ánh đầy đủ điều kiện thực nghiệm, nơi mà khối lượng hiệu dụng của điện tử và lỗ trống thường khác nhau đáng kể. Có thể kể đến như vật liệu GaAs có khối lượng hiệu dụng của lỗ trống xấp xỉ 6,67 lần so với điện tử [9,10], trong khi ở ZnO giá trị này vào khoảng 2 lần [11], …

Sự mất cân bằng khối lượng giữa điện tử và lỗ trống có thể làm thay đổi phổ năng lượng, độ bền của liên kết electron–lỗ trống, cũng như mức độ lai hóa giữa exciton và photon trong trạng thái polariton. Do đó, sự mất cân bằng này ảnh hưởng trực tiếp đến bản chất của pha ngưng tụ, nhiệt độ chuyển pha và sự hình thành khe năng lượng của hệ. Vì vậy, việc xây dựng và khảo sát các mô hình lý thuyết có xét đến trường hợp khối lượng điện tử và lỗ trống không bằng nhau là cần thiết, không chỉ để mô tả chính xác hơn các tính chất vật lý của hệ vi hốc bán dẫn trong điều kiện thực tế mà còn để làm sáng tỏ hơn cơ chế ngưng tụ và chuyển pha của trạng thái polariton.

Trong bài báo này, tôi nghiên cứu ảnh hưởng của sự mất cân bằng khối lượng giữa điện tử và lỗ trống lên nhiệt độ chuyển pha của trạng thái ngưng tụ polariton trong vi hốc bán dẫn. Cụ thể, sự mất cân bằng khối lượng được khảo sát thông qua thay đổi tích phân nhảy nút của lỗ trống, trong khi các tham số còn lại của hệ

được giữ cố định. Các kết quả thu được cho phép làm rõ vai trò của mất cân bằng khối lượng đối với bản chất pha ngưng tụ và độ bền của trạng thái polariton trong hệ vi hốc bán dẫn.

Bố cục của bài báo được chia thành bốn phần. Sau phần mở đầu, bài báo trình bày mô hình lý thuyết cùng các kết quả tính toán giải tích trong phần 2. Trên nền tảng đó, phần 3 tập trung phân tích các kết quả tính số, bao gồm sự phụ thuộc của tham số trật tự của trạng thái ngưng tụ và giản đồ năng lượng của hệ vào sự thay đổi khối lượng lỗ trống. Cuối cùng, bài báo khái quát những kết quả chính và đưa ra các nhận xét tổng quát trong phần 4.

2. Mô hình và tính toán lý thuyết

Để khảo sát trạng thái ngưng tụ polariton trong vi hốc bán dẫn, tôi xét hệ gồm điện tử, lỗ trống và photon trong cấu trúc vi hốc. Trong không gian xung lượng, Hamiltonian mô tả hệ có dạng:

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_0 + \mathcal{H}_{\text{int}} \tag{1}$$

trong đó

$$\mathcal{H}_0 = \sum_{\mathbf{k},\alpha=\text{e,h}} \varepsilon_{\mathbf{k}}^{\alpha} c_{\alpha\mathbf{k}}^{\dagger} c_{\alpha\mathbf{k}} + \sum_{\mathbf{q}} \omega_{\mathbf{q}} \psi_{\mathbf{q}}^{\dagger} \psi_{\mathbf{q}} \tag{2}$$

mô tả năng lượng của hệ khi không có tương tác với $\alpha = e,h$ là chỉ số mô tả điện tử trên dải dẫn và lỗ trống ở dải hóa trị, $c_{\alpha\mathbf{k}}^{\dagger}\left(c_{\alpha\mathbf{k}}\right) / \psi_{\mathbf{q}}^{\dagger}\left(\psi_{\mathbf{q}}\right)$ lần lượt biểu diễn toán tử sinh (hủy) của các điện tử, lỗ trống / photon không spin mang xung lượng $\mathbf{k}$ / $\mathbf{q}$. Các đại lượng $\varepsilon_{\mathbf{k}}^{\alpha} / \omega_{\mathbf{q}}$ lần lượt là năng lượng tán sắc của điện tử (lỗ trống) /photon được xác định bởi:

$$\varepsilon_{\mathbf{k}}^{\alpha} = -2t^{\alpha}\left(\cos k_x + \cos k_y\right) + \frac{E_g + 8t^{\alpha} - \mu}{2} \tag{3}$$

$$\omega_{\mathbf{q}} = \sqrt{(c\mathbf{q})^2 + \omega_c^2} - \mu \tag{4}$$

với t^{α} là tích phân nhảy nút của điện tử và lỗ trống, đại lượng này tỷ lệ nghịch với khối lượng của điện tử và lỗ trống nên được dùng làm đại lượng để khảo sát sự mất cân bằng khối lượng điện tử và lỗ trống trong vi hốc. E_g là khoảng cách từ đáy của dải dẫn tới đỉnh của dải hóa trị, nếu $E_g > 0$ hệ ở trạng thái bán dẫn, $E_g < 0$ hệ ở trạng thái bán kim loại. c là vận tốc ánh sáng trong vi hốc, ω_c là năng lượng của photon tại xung lượng **q** = 0 và μ là thế hóa học.

$$\mathcal{H}_{\text{int}} = -\frac{U}{N} \sum_{\mathbf{k},\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2} e_{\mathbf{k}+\mathbf{k}_1}^{\dagger} e_{\mathbf{k}_1} h_{-\mathbf{k}+\mathbf{k}_2}^{\dagger} h_{\mathbf{k}_2} - \frac{g}{\sqrt{N}} \sum_{\mathbf{k},\mathbf{q}} \left(e_{\mathbf{k}+\mathbf{q}}^{\dagger} h_{-\mathbf{k}}^{\dagger} \psi_{\text{q}} + h_{-\mathbf{k}} e_{\mathbf{k}+\mathbf{q}} \psi_{\mathbf{q}}^{\dagger} \right) \tag{5}$$

mô tả tương tác Coulomb giữa điện tử - lỗ trống và tương tác điện tử / lỗ trống - photon với cường độ tương tác lần lượt là U và g, trong đó *N* là số nút mạng trong giếng lượng tử.

Sử dụng gần đúng Hartree-Fock không giới hạn (UHF) cho Hamiltonian trong phương trình (1) đồng thời bỏ qua các thăng giáng, Hamiltonian hiệu dụng được viết lại dưới dạng:

$$\mathcal{H}_{UHF} = \sum_{\mathbf{k}} \xi_{\mathbf{k}}^{e} e_{\mathbf{k}}^{\dagger} e_{\mathbf{k}} + \sum_{\mathbf{k}} \xi_{\mathbf{k}}^{h} h_{\mathbf{k}}^{\dagger} h_{\mathbf{k}} + \Delta \sum_{\mathbf{k}} \left(e_{\mathbf{k}}^{\dagger} h_{-\mathbf{k}}^{\dagger} + H.c \right) + \sum_{\mathbf{q}} \omega_{\mathbf{q}} \psi_{\mathbf{q}}^{\dagger} \psi_{\mathbf{q}} + \left(\sqrt{N} \Lambda \psi_0^{\dagger} + H.c \right) \tag{6}$$

trong đó $\xi_{\mathbf{k}}^{e}\left(\xi_{\mathbf{k}}^{h}\right)$ là các năng lượng tán sắc khi có đóng góp của độ dịch Hartree. Hai đại lượng mới xuất hiện là Δ, Λ đóng vai trò như tham số trật tự mô tả trạng thái ngưng tụ của hệ, được xác định bởi:

$$\Delta = -\frac{g}{\sqrt{N}} \langle \psi_0 \rangle - \frac{U}{N} \sum_{\text{k}} d_{\text{k}} \tag{7}$$

$$\Lambda = -\frac{g}{N}\sum_{\mathrm{k}} d_{\mathrm{k}} \tag{8}$$

với $d_{\mathbf{k}} = \left\langle e_{\mathbf{k}}^{\dagger} h_{-\mathbf{k}}^{\dagger} \right\rangle = \left\langle h_{-\mathbf{k}} e_{\mathbf{k}} \right\rangle = d_{\mathbf{k}}^{*}$ là mật độ exciton ở trạng thái xung lượng **k**. Khi tham số trật tự khác không, hệ ở trạng thái ngưng tụ và ngược lại.

Tiếp theo tôi sử dụng phép biến đổi Bogoliubov để chéo hóa Hamiltonian trong phương trình (6), với các toán tử giả hạt mới được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} a_{\mathrm{k}}^{\dagger} &= \alpha_{\mathrm{k}} e_{\mathrm{k}}^{\dagger} + \beta_{\mathrm{k}} h_{-\mathrm{k}} \\ b_{\mathrm{k}}^{\dagger} &= -\beta_{\mathrm{k}} e_{\mathrm{k}}^{\dagger} + \alpha_{\mathrm{k}} h_{-\mathrm{k}} \end{aligned} \tag{9}$$

trong đó α_{k} và β_{k} thỏa mãn điều kiện $\alpha_{\mathrm{k}}^2 + \beta_{\mathrm{k}}^2 = 1$, đồng thời định nghĩa toán tử photon mới

$$\Psi_{\mathrm{q}} = \psi_{\mathbf{q}}^{\dagger} - \frac{g}{\sqrt{N}} \frac{d_{\mathrm{k}}}{\omega_c} \delta_{\mathrm{q},0} \tag{10}$$

Khi đó Hamiltonian chéo hóa hoàn toàn có dạng

$$\mathcal{H}_{dia} = \sum_{\mathbf{k}} \left(E_{\mathbf{k}}^{1} a_{\mathbf{k}}^{\dagger} a_{\mathbf{k}} + E_{\mathbf{k}}^{2} b_{\mathbf{k}}^{\dagger} b_{\mathrm{k}} \right) + \sum_{\mathbf{q}} \omega_{\mathbf{q}} \Psi_{\mathbf{q}}^{\dagger} \Psi_{\mathbf{q}} \tag{11}$$

trong đó

$$E_{\mathbf{k}}^{1(2)} = \frac{\xi_{\mathbf{k}}^{e} - \xi_{\mathbf{k}}^{h}}{2} \pm \mathrm{sgn}\left(\xi_{\mathbf{k}}^{e} + \xi_{\mathbf{k}}^{h} \right) \frac{\mathrm{W}_{\mathbf{k}}}{2} \tag{12}$$

$$\mathrm{W}_{\mathbf{k}} = \sqrt{\left(\xi_{\mathbf{k}}^{e} + \xi_{\mathbf{k}}^{h} \right)^2 + 4\left|\Delta\right|^2} \tag{13}$$

Lưu ý là $E_{\mathbf{k}}^{1(2)}$ là các trạng thái năng lượng giả hạt fermion mới của hệ điện tử - lỗ trống, khe năng lượng giả hạt xuất hiện khi tham số trật tự Δ khác không.

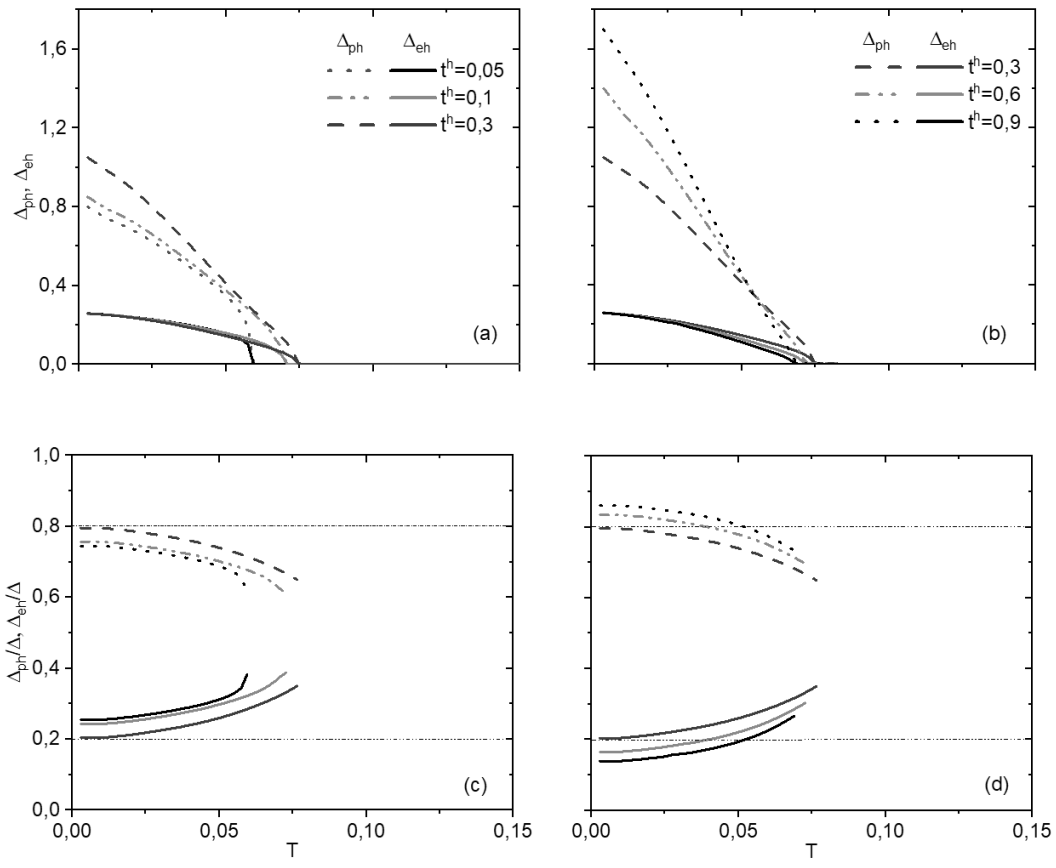
3. Kết quả tính số và thảo luận

Trong phần này, tôi trình bày các kết quả tính số của các tham số trật tự đã được tính giải tích ở phần 2 cho hệ hai chiều gồm N = 200 x 200 nút mạng. Các kết quả trình bày được tính trong hệ đơn vị tự nhiên, đồng thời tôi cũng chọn t^e = 1 làm đơn vị năng lượng, do đó các đại lượng trong bài đều được tính theo đơn vị t^e. Như đã đề cập, tích phân nhảy nút $t^{e(h)}$ tỷ lệ nghịch với khối lượng của điện tử (lỗ trống), do đó trong phần này tôi thay đổi t^h nhằm khảo sát ảnh hưởng của sự thay đổi khối lượng lỗ trống đến trạng thái ngưng tụ polariton. Giá trị t^h được chọn sao cho lỗ trống trong dải hóa trị luôn nặng hơn điện tử trong dải dẫn.

Trong công trình [12], tôi đã khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ và thế tương tác Coulomb đến sự hình thành trạng thái ngưng tụ polariton. Tuy nhiên, nghiên cứu này được thực hiện dưới giả thiết đơn giản hóa t^e = t^h = 1, do đó các kết quả thu được chưa phản ánh đầy đủ đặc trưng của các hệ thực nghiệm. Trong bài báo này, tôi làm rõ vai trò của sự khác biệt khối lượng lỗ trống lên nhiệt độ chuyển pha $\mathrm{T_c}$ của hệ. Các kết quả tính số được thực hiện cho hệ bán dẫn với $E_g = 0{,}5$, tương tác Coulomb $U = 1{,}0$, hằng số ghép $g = 0{,}2$, tần số photon $\omega_c = 0{,}5$ và mật độ kích thích $n = 0{,}1$.

Trước tiên, tôi khảo sát tham số trật tự trạng thái ngưng tụ Δ trong phương trình (7) theo nhiệt độ T khi thay đổi các giá trị khác nhau của t^h. Trong phương trình (7) d_{k} cho biết sự hình thành ghép cặp điện tử - lỗ trống hình thành exciton trong hệ, do đó $\Delta_{eh} = -\frac{U}{N}\sum_{\mathrm{k}} d_{\mathrm{k}}$ được gọi là tham số trật tự trạng thái ngưng tụ

exciton, $\langle \psi_0 \rangle$ là biên độ trung bình của trường điện từ, liên quan đến trạng thái kết hợp của photon, do đó $\Delta_{ph} = -\frac{g}{\sqrt{N}}\langle \psi_0 \rangle$ được gọi là tham số trạng thái ngưng tụ photon của hệ. Tùy thuộc vào sự cạnh tranh của hai tham số này mà hệ có thể tồn tại ở pha ngưng tụ exciton-like polariton, polariton hay là photon-like polariton. Hình 1 thể hiện các tham số trật tự trạng thái ngưng tụ exciton và photon theo T khi t^h thay đổi. Có thể thấy, ứng với mỗi giá trị t^h xác định, ta luôn thấy các tham số trật tự Δ_{ph} chiếm ưu thế hơn so với Δ_{eh}, cả hai tham số này đều giảm nhanh khi nhiệt độ tăng và bằng không tại cùng một giá trị xác định của nhiệt độ gọi là nhiệt độ chuyển pha T_c. Trong vùng t^h nhỏ ($t^h \leq 0{,}3$), nhiệt độ chuyển pha T_c tăng khi t^h tăng (Hình 1a), trong khi đó, trong vùng t^h lớn ($t^h > 0{,}3$) nhiệt độ chuyển pha T_c giảm khi t^h tăng (Hình 1b). Thật vậy, khi t^h nhỏ hoặc sự mất cân bằng khối lượng lớn, các lỗ trống trở nên rất "nặng" và chúng có xu hướng định xứ, làm giảm khả năng lai hóa giữa các electron dẫn và các lỗ trống ở dải hóa trị. Kết quả là, các exciton và sau đó là polariton khó hình thành. Tăng t^h làm tăng độ linh động của lỗ trống, giúp quá trình ghép cặp điện tử - lỗ trống hình thành exciton trở nên dễ dàng hơn, dẫn đến nhiệt độ chuyển pha T_c tăng. Khi t^h lớn, các lỗ trống trở nên linh động hơn, tạo điều kiện cho quá trình ghép cặp với điện tử trên dải dẫn để hình thành exciton. Tuy nhiên, với thế tương tác Coulomb nhỏ, chính sự gia tăng độ linh động này lại làm suy giảm độ bền của liên kết electron–lỗ trống, khiến exciton dễ bị phân ly thành các hạt tự do. Hệ quả là nhiệt độ chuyển pha T_c giảm xuống.

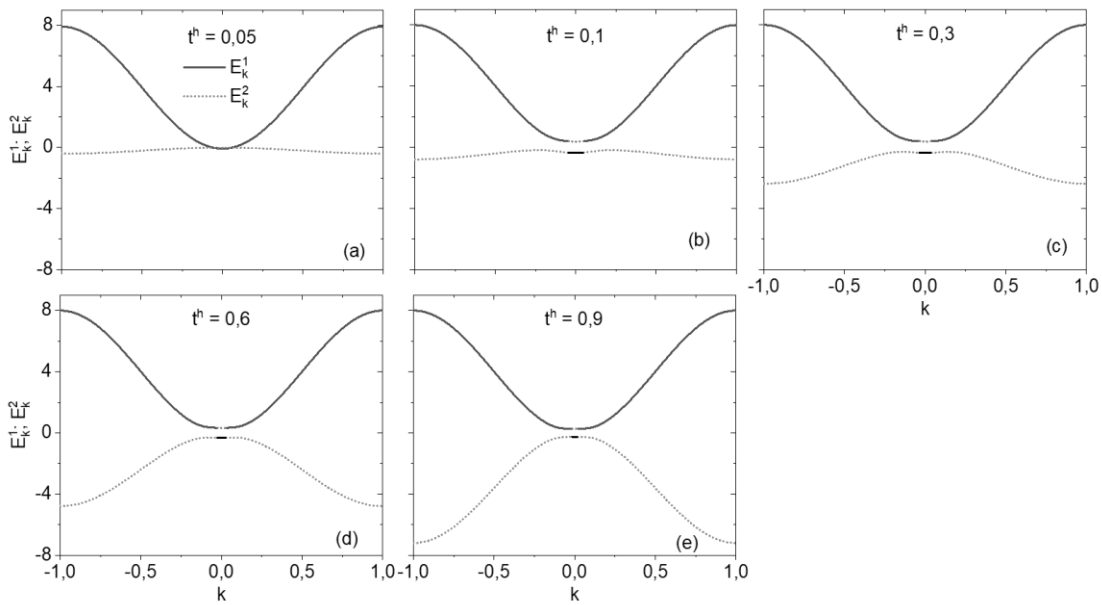


Hình 1. *Tham số trật tự trạng thái ngưng tụ photon Δ_{ph} và exciton Δ_{eh} theo nhiệt độ T ứng với các giá trị khác nhau của t^h*

Để làm rõ hơn bản chất của các pha ngưng tụ polariton, trong Hình 1c-d, tôi trình bày các tỷ số Δ_{ph}/Δ và Δ_{eh}/Δ theo nhiệt độ. Các đại lượng này cho phép đánh giá mức độ đóng góp tương đối của thành phần photon và thành phần exciton trong trạng thái ngưng tụ. Cụ thể, khi $\Delta_{ph}/\Delta < 20\%$, trạng thái ngưng tụ mang đặc trưng exciton-like polariton, nghĩa là thành phần exciton chiếm ưu thế. Ngược lại, khi $\Delta_{ph}/\Delta > 80\%$, hệ biểu hiện pha ngưng tụ photon-like polariton, trong đó thành phần photon đóng vai trò chủ đạo. Trong miền trung gian $20\% \le \Delta_{ph}/\Delta \le 80\%$, trạng thái ngưng tụ được xác định là pha polariton, phản ánh sự lai hóa đáng kể giữa hai thành phần exciton và photon [13]. Hình 1c cho thấy với mọi giá trị t^h nhỏ, hệ đều ngưng tụ ở trạng thái polariton. Với $t^h > 0{,}3$, hệ ngưng tụ ở trạng thái photon-like polariton và sau đó là polariton khi nhiệt độ tăng.

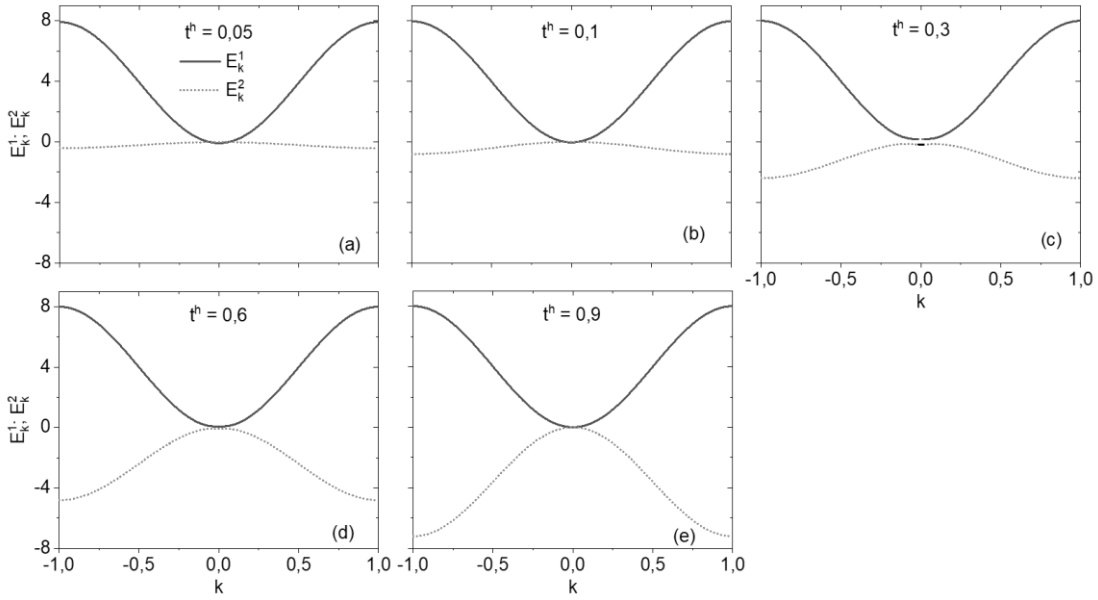
Dựa trên các kết quả ở Hình 1a-b, tôi tiếp tục khảo sát giản đồ năng lượng của các giả hạt fermion tại hai nhiệt độ đặc trưng T = 0,06 và T = 0,07, tương ứng được trình bày ở Hình 2-3. Việc phân tích giản đồ năng lượng tại các nhiệt độ này cho phép làm rõ hơn sự hình thành khe năng lượng khi tham số trật tự khác không.

Tại T = 0,06, trong trường hợp mất cân bằng khối lượng rất lớn, tương ứng với $t^h = 0{,}05$ (Hình 2a), dải năng lượng của lỗ trống gần như phẳng và chưa xuất hiện khe năng lượng. Điều này cho thấy tham số trật tự Δ vẫn bằng không nên hệ tồn tại ở trạng thái không ngưng tụ, hay nói cách khác là trạng thái lỏng gồm điện tử, lỗ trống và photon. Ngược lại, ở các trường hợp từ Hình 2b-e, khe năng lượng đã được hình thành rõ rệt, phản ánh sự xuất hiện của tham số trật tự trạng thái ngưng tụ khác không ($\Delta \neq 0$). Khi đó, hệ chuyển sang trạng thái ngưng tụ polariton.



Hình 2. *Năng lượng của các giả hạt mới theo phương (k,k) trong vùng Brillouin thứ nhất tại T = 0,06 khi t^h thay đổi*

Đáng chú ý, độ lớn khe năng lượng đạt giá trị cực đại tại $t^h = 0{,}1$, sau đó giảm dần khi t^h tiếp tục tăng. Xu hướng này cho thấy hiệu ứng ghép cặp electron–lỗ trống là mạnh nhất tại $t^h = 0{,}1$, trong khi ở các giá trị t^h lớn hơn, đóng góp của thành phần exciton vào trạng thái ngưng tụ polariton suy giảm dần.



Hình 3. *Năng lượng của các giả hạt mới theo phương (k,k) trong vùng Brillouin thứ nhất tại T = 0,07 khi t^h thay đổi*

Tại T = 0,07, kết quả trong Hình 3 cho thấy khe năng lượng chỉ còn xuất hiện tại $t^h = 0,3$. Điều này chứng tỏ khi nhiệt độ tăng lên, trạng thái ngưng tụ chỉ còn được duy trì với t^h phù hợp. Các kết quả trên Hình 2 và 3 hoàn toàn phù hợp với kết quả trên hình 1. Tại những giá trị tham số trật tự khác không, xuất hiện khe năng lượng.

4. Kết luận

Bài báo đã khảo sát ảnh hưởng của mất cân bằng khối lượng giữa điện tử và lỗ trống lên nhiệt độ chuyển pha trạng thái ngưng tụ polariton trong vi hốc bán dẫn thông qua phân tích các tham số trật tự của thành phần exciton và photon. Kết quả cho thấy nhiệt độ chuyển pha T_c phụ thuộc phi tuyến vào tích phân nhảy nút của lỗ trống t^h. Trong vùng t^h nhỏ, T_c tăng khi t^h tăng, trong khi ở vùng t^h lớn, T_c giảm theo t^h. Phân tích tỷ lệ đóng góp tương đối của hai tham số trật tự cho thấy hệ chủ yếu tồn tại ở pha ngưng tụ polariton; đồng thời, khi t^h tăng, hệ dần xuất hiện vùng ngưng tụ mang bản chất photon-like polariton. Bên cạnh đó, giản đồ phổ năng lượng của các giả hạt fermion mới chỉ ra rằng sự hình thành khe năng lượng gắn liền với sự xuất hiện của trạng thái ngưng tụ, và độ rộng khe này giảm dần khi nhiệt độ tăng.

Tài liệu tham khảo:

[1]. D. Sanvitto; S. Kéna-Cohen (2016), "The road towards polaritonic devices", *Nature materials*, 15, pp. 1061-73.
[2]. M. Lindemann, G. F. Xu, T. Pusch, R. Michalzik, M. R. Hofmann, I. Žutić, N. C. Gerhardt (2019), "Ultrafast spin-lasers", *Nature*, 568, pp. 212-215.
[3]. F. R. Hu, Z. Fei (2020), "Recent progress on exciton polaritons in layered transition-metal dichalcogenides", *Advanced Optical Materials*, 8, pp. 1901003.
[4]. S. Latini, E. Ronca, U. De Giovannini, H. Hübener, A. Rubio (2019), "Cavity control of excitons in two-dimensional materials", *Nano Letters,* 19, pp. 3473-3479.
[5]. K. Kamide and T. Ogawa (2011), "Ground-state properties of microcavity polariton condensates at arbitrary excitation density", *Physical Review B,* 83, pp. 165319.
[6]. B.-D. Hoi and V.-N. Phan (2016), "Thermal fluctuations in a system of microcavity excitonpolariton condensations", *Physica Status Solidi B*, 254, pp. 1-7.
[7]. Q.-H. Ninh and V.-N. Phan (2019), "BCS-BEC crossovers of microcavity exciton-polariton condensates", *Physica B,* 573, pp. 72.

[8]. Dinh-Hoi Bui and Van-Nham Phan (2017), “Phase diagram of microcavity exciton-polariton condensates”, *Europhysics Letters,* 116(5), 57004.
[9] W. Nakwaski (1995), “Effective masses of electrons and heavy holes in GaAs, InAs, A1As and their ternary compounds”, *Physica B* 210, 1.
[10] S. Pau, G. Bjork, J. Jacobson, H. Cao, and Y. Yamamoto (1995), “Stimulated emission of a microcavity dressed exciton and suppression of phonon scattering”, *Phys. Rev. B* 51, 7090.
[11] B. Enright and D. Fitzmaurice (1996), “Spectroscopic Determination of Electron and Hole Effective Masses in a Nanocrystalline Semiconductor Film”*, J. Phys. Chem.* 100, 1027.
[12] N. T. Hậu (2025), “Phân tích hàm cảm ứng tĩnh trong hệ có ngưng tụ polariton ở trạng thái cân bằng”, *Hội thảo khoa học tự nhiên và ứng dụng trong thời đại số*, NSA2025, lần thứ 2, 351-356.
[13] K. Kamide and T. Ogawa (2011), “Ground-state properties of microcavity polariton condensates at arbitrary excitation density”, *Phys. Rev. B* 83, 165319.